

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

РУДИК АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ  
ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВИХ ТА ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКТИВНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ КІЛ

Спеціальність 05.11.08 - "Радіовимірювальні прилади"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 1997

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі радіотехніки Вінницького державного технічного університету.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Суп'ян Віліамін Якович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Кунченко Юрій Петрович;

кандидат технічних наук, доцент  
Кухарчук Василь Васильович

Провідна установа: Одеський державний політехнічний університет

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1997р. о \_\_\_\_\_ годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 10.01.01 у Вінницькому  
державному технічному університеті за адресою: 286021, м.Вінниця,  
Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького  
державного технічного університету.

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1997р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Юхимчук С.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Науково-технічний прогрес пов'язаний з подальшим вдосконаленням засобів вимірювання, покращенням їх якості та автоматизацією процесу вимірювання, створенням нових засобів автоматичних приладів в електрорадіовимірювальній техніці, електроніці, автоматичній та телемеханіці.

В сучасних радіотехнічних системах та пристроях автоматизації знайшли широке використання аналогові інформаційні електричні машини, що виконують різні функціональні перетворення електричних та механічних величин. Найбільш поширені серед таких електричних машин фазообертачі, поворотні трансформатори (ПТ), сельсини і тахогенератори.

Прецизійні двополюсні ПТ, які використовуються в якості вимірювальних елементів, дозволяють передати кут з похибкою  $\Delta\varphi \leq \pm(2+5)'$ . Подальше підвищення точності систем передачі кута з двополюсними ПТ досягається використанням аналогових та цифрових систем передачі кута підвищеної точності, похибка яких  $\Delta\varphi \leq \pm 1'$  в діапазоні  $0+360^\circ$ .

Найбільш перспективним напрямком підвищення точності є використання в системах передачі кута вимірювальних перетворювачів з електричною редукцією, в яких відбувається зменшення впливу технологічних факторів виготовлення за рахунок їх осереднення в межах кута  $360^\circ$ .

Теорія електромеханічних вимірювальних елементів та їх розрахунків були розвинуті в роботах А.А.Ахметжанова, Д.О.Бичатіна, Р.К.Памфілова, В.К.Карпенко, А.В.Корицького, Ю.М.Пульєра, Є.В.Арменського, А.А.Батовріна та інших.

Тому що в електричних машинах взаємна індуктивність між статорними і роторними обмотками змінюється по деякому заданому закону, то ці електричні кола є параметричними. В цьому випадку зміна (модуляція) параметра здійснюється електромеханічним способом (ПТ або сельсин, що обертається електродвигуном).

Електричні мікромашини в статичному режимі знайшли широке використання в радіотехнічних та радіовимірювальних приладах для відображення і перетворення інформації та розглянуті в роботах С.М.Маєвського, Ю.О.Скрипника, В.Я.Суп'яна, Є.Д.Колтика, В.Г.Кадука, С.А.Кравченко, В.П.Кашлева, В.Л.Камінського та інших. Динамічний режим роботи електромеханічних параметричних кіл досліджений недостатньо повно: не розроблена загальна теорія N-фазних параметричних кіл та їх використання в радіотехнічних пристроях вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів. Тому подальший розвиток теорії та практики використання таких кіл в радіовимірювальних приладах є актуальним.

Мета роботи - дослідження та розробка узагальненої та часткових математичних моделей індуктивних параметричних кіл (ІПК) та принци-

пів побудови на їх основі пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

1) розробка та дослідження узагальненої та часткових математичних моделей N-фазних ІПК;

2) дослідження та розробка пристроїв відображення фазової інформації між гармонійними та радіоімпульсними сигналами на ІПК;

3) дослідження та розробка пристроїв вимірювання часу затримки з використанням ІПК;

4) дослідження та розробка пристрою індикації несиметричності N-фазної системи напруг з ІПК;

5) дослідження та розробка апаратури атестації вимірювачів кута фазового зсуву на основі ІПК;

6) дослідження та розробка 90°-них фазорізничних кіл на ІПК;

7) дослідження та розробка пристрою вимірювання кутової швидкості обертання валу робочого механізму та системи параметричної фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) обертання синхронного електро-двигуна на основі ІПК;

8) експериментальні дослідження інструментальної похибки ІПК в різних режимах роботи та пристрою вимірювання кута фазового зсуву на основі узагальненої математичної моделі N-фазних ІПК.

Методи досліджень. В роботі використані методи математичної статистики, спектральний аналіз перехідних процесів, метод апроксимації функцій, спектральний метод проходження сигналів через електричні кола.

Наукова новизна роботи:

- розроблені теоретичні основи роботи N-фазних ІПК в статичних та динамічних режимах;

- розроблені часткові (за режимами роботи) та узагальнена математичні моделі ІПК, а також отримані співвідношення, що дозволяють для обраного режиму роботи визначити вхідні сигнали ІПК;

- на основі математичного моделювання ІПК розроблений ряд пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів з використанням ІПК;

- отримані аналітичні вирази для визначення інструментальної похибки ІПК при його роботі в різних режимах та проведена їх експериментальна оцінка з використанням методів математичної статистики.

Практична цінність. На основі теоретичних та експериментальних досліджень в дисертаційній роботі отримані:

- структурні схеми оптимальних пристроїв вимірювання кута фазового зсуву між гармонійними сигналами;

- структурні схеми фазометрів з масштабно-часовим перетворенням

гармонійних та радіоімпульсних сигналів;

- структурні схеми вимірювачів групового часу запізнення чотирьохполюсників та ліній зв'язку;

- структурні схеми вимірювачів несиметричності двофазної та N-фазної систем напруг;

- структурні схеми вимірювальних двофазних та N-фазних генераторів;

- структурні схеми вимірювача кутової швидкості обертання валу робочого механізму та системи ФАПЧ обертання синхронних електродвигунів з управлінням за кутом розузгодження;

- формули для інженерного розрахунку складових інструментальної похибки та вхідних сигналів ІПК для різних режимів роботи.

Впровадження результатів роботи. Матеріали дисертаційної роботи використовуються:

- в системах фазової синхронізації роботи електроприводу лінії в технологічному процесі ламінування плит та впроваджені на Рівненському заводі торгівельного обладнання;

- при вимірюванні та регулюванні кутової швидкості обертання шпінделя в станках з числовим програмним управлінням марки 16K20T1 і 3283C на Рівненському радіотехнічному заводі;

- в госпрозрахунковій НДР "Розробка і створення лазерного волоконно - оптичного прецизійного вимірювача мікропереміщень" (Номер держ. реєстрації 0193U029454);

- в навчальному процесі по курсу "Електромеханічні пристрої радіоелектронних засобів".

На захист виносяться:

- теоретичні основи роботи N-фазних ІПК в статичних та динамічних режимах;

- часткові (за режимами роботи) та узагальнена математичні моделі N-фазних ІПК;

- методика визначення вхідних сигналів N-фазного ІПК для обраного режиму роботи;

- структурні схеми пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів з використанням ІПК;

- аналітичні співвідношення для визначення інструментальної похибки ІПК при його роботі в різних режимах;

- результати математичного моделювання та експериментальної оцінки інструментальної похибки ІПК, отримані на основі чисельного моделювання з використанням методів математичної статистики.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на 3-й НТК "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах та конверсії виробництва" (Хмельницький, 1995), 3-й міжна-

родній НТК "Контроль и управление в технических системах" (Вінниця, 1995), Українській НТК "Метрологія та вимірювальна техніка" (Харків, 1995), 3-й міжнародній НТК "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибірськ, 1996), міжнародній НТК "Приладобудування-96" (Вінниця-Судак, 1996), міжнародному симпозиумі "Наука і підприємництво" (Львів, 1997), наукових семінарах кафедри радіотехніки.

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковані 15 друкованих робіт, в тому числі монографія "Параметрическое преобразование информации в фазоизмерительной технике", а також отримано патент України на винахід та 3 позитивних рішення експертизи про видачу патенту України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку скорочень, вступу, чотирьох глав, висновків, списку літератури та додатків. Зміст роботи викладений на 147 сторінках машинописного тексту, ілюструється 72 рисунками та 2 таблицями. Додатки містять 25 сторінок. Список літератури складається з 152 назв.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі приводиться обґрунтування актуальності проведених досліджень, сформульовані основні положення, що виносяться на захист, визначені практична цінність та наукова новизна отриманих результатів, висвітлені питання апробації роботи та публікацій.

В першій главі проведено огляд сучасних методів та пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів з використанням ІПК, розроблені класифікації режимів роботи ІПК та пристроїв на їх основі, а також визначені мета роботи та задачі досліджень. Огляд літератури довів необхідність розробки нових режимів роботи ІПК та їх систематизацію, узагальненої математичної моделі ІПК та необхідність більш детального аналізу складових інструментальної похибки при роботі ІПК в різних режимах.

В другій главі проведений теоретичний аналіз статичного та динамічного режимів роботи N-фазних ІПК. Показано, що в статичному режимі роботи ІПК може бути використано як фазообертач або в якості фазового індикатора в радіовимірювальній апаратурі. В динамічному режимі ІПК може бути використано у вимірювальних приладах для перетворення спектру радіосигналів: перетворення частоти, зчитування інформації при масштабно-часовому перетворенні (МЧП) гармонійних та імпульсних сигналів, отримання двочастотного сигналу з придушеною несучою. Особливе місце займає динамічний режим роботи, суміщений із статичним. В цьому випадку ІПК може бути використано у вимірювальних двофазних та N-фазних генераторах, в системах ФАПЧ обертання валу



синхронного електродвигуна і т.і. Отримано загальне співвідношення, що апроксимує всі вказані алгоритми роботи або сумарний магнітний потік (СМП) статорних та роторних обмоток ІПК у вигляді

$$\dot{\Phi}_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^N \Phi_{m.k} \cos[\omega t + \varphi + 2\pi(k-1)/N] \cdot \exp\{j[\Omega t + \alpha + 2\pi(k-1)/N]\}, \quad (1)$$

де  $\Phi_{m.k}$  - амплітуда  $k$ -тої складової СМП;  $\alpha + 2\pi(k-1)/N$  - кут повороту ротора ІПК з врахуванням просторового положення обмоток збудження;  $\omega$  і  $\varphi + 2\pi(k-1)/N$  - частота і початкова фаза напруг, що подаються на обмотки збудження ІПК;  $\Omega$  - кутова швидкість обертання (КШО) ротора або резонансна частота фільтрів, утворених конденсаторами і обмотками ІПК (режим статичного МЧП);  $N$  - кількість обмоток збудження ІПК.

Умова ортогональності для обраної системи апроксимуючих функцій (експоненційних) буде мати такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} k-m &= 0.25N(2n+1), \text{ при } N \geq 3; \\ k-m &= 2n+1, \quad \text{при } N=2, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Аналіз співвідношень (2) показує, що умова ортогональності виконується для ІТ та для обмоток, просторовий кут між якими дорівнює  $0.5\pi(2n+1)$  при  $N=4p$ ,  $p=1, 2, 3, \dots$

Вихідними сигналами (інформативними параметрами)  $N$ -фазного ІПК є кут повороту ротора (індикаторні режими роботи) (див. табл.1, п.7+9), вихідна напруга роторної обмотки (див. табл.1, п.1+4) та система вихідних напруг статорних обмоток (див. табл.1, п.5, 6), які в загальному випадку визначаються такими співвідношеннями:

$$\alpha = \varphi_{ст} - \varphi_p = \arctg \frac{\text{Im}\{\dot{\Phi}_{\Sigma ст}(t)\}}{\text{Re}\{\dot{\Phi}_{\Sigma ст}(t)\}} - \arctg \frac{\text{Im}\{\dot{\Phi}_{\Sigma р}(t)\}}{\text{Re}\{\dot{\Phi}_{\Sigma р}(t)\}}; \quad (3)$$

$$U_{вих}(t) = d[\text{Re}\{\dot{\Phi}_{\Sigma ст}(t)\}]/dt = \sum_{k=1}^N d[\text{Re}\{\dot{\Phi}_{ст.k}(t)\}]/dt; \quad (4)$$

$$U_{вих.k} = d[\text{Re}\{\dot{\Phi}_{ст.k}(t)\}]/dt. \quad (5)$$

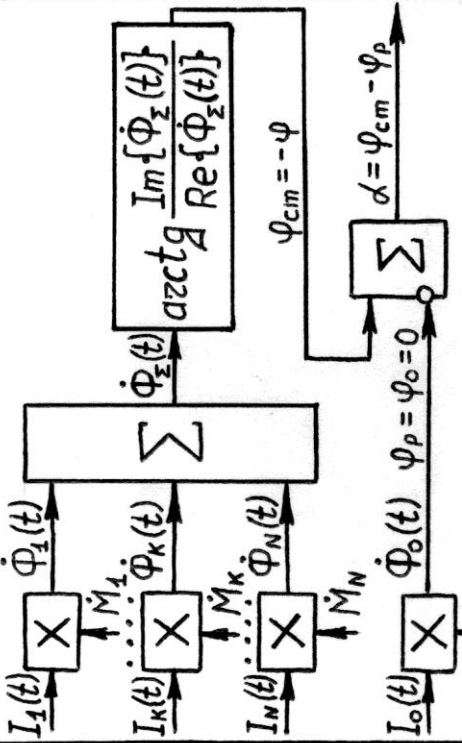
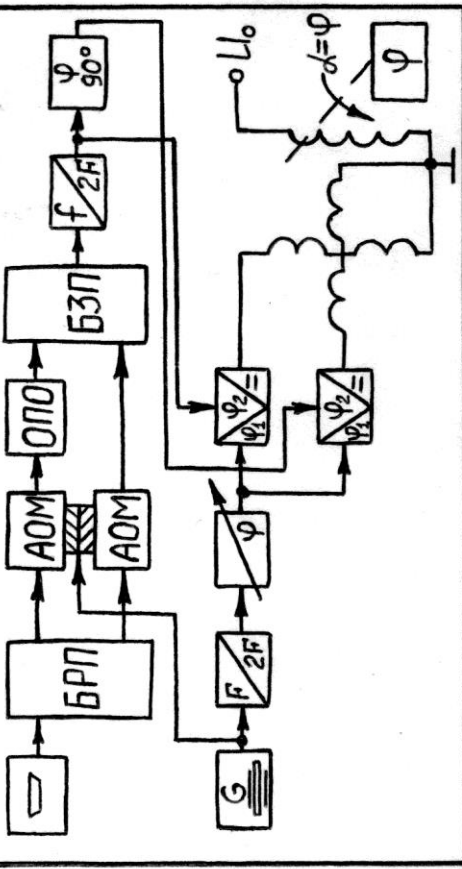
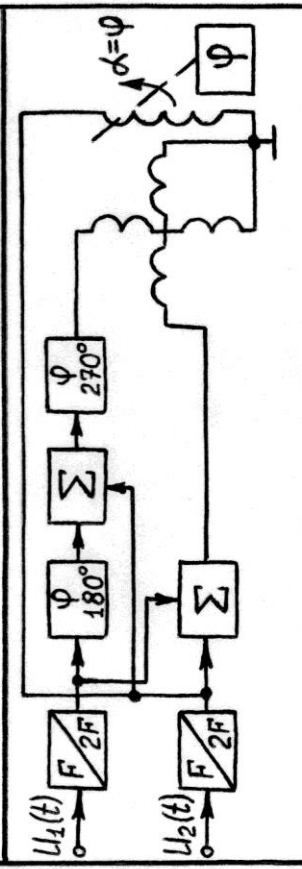
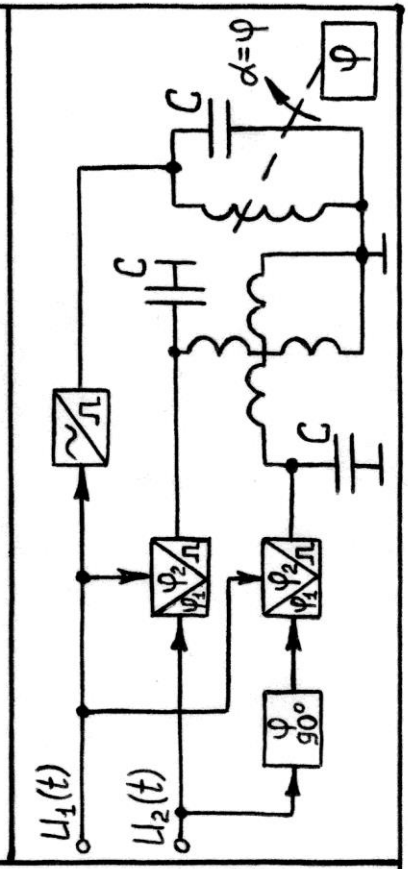
Часткові математичні моделі (за режимами роботи) наведені в таблиці 1 для трьох груп режимів разом з алгоритмами роботи ІПК. Узагальнену математичну модель ІПК можна отримати з аналізу співвідношень (1) та (3)+(5) шляхом об'єднання часткових математичних моделей. Для всіх режимів роботи ІПК СМП статора та ротора визначається з

№ п/п	Режим роботи ІПК	Алгоритм роботи і математична модель ІПК	Реалізація пристрою за математичною моделлю
1	2	3	4
1	Статичний режим зворотного зв'язку	<p>1) <math>I_k(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1) + \varphi \right];</math>  <math>\dot{M}_k = M \exp \left\{ j \left[ \alpha + \frac{2\pi}{N}(k-1) \right] \right\};</math>  <math>U_{\text{вих}}(t) = 0.5 N k_{\text{тр}} U_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha).</math></p>	
2	Режим пе- ретворення частоти	<p>2) <math>I_k(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1) + \varphi \right];</math>  <math>\dot{M}_k(t) = M \exp \left\{ j \left[ \Omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1) \right] \right\};</math>  <math>U_{\text{вих}}(t) = 0.5 N k_{\text{тр}} U_m \sin[(\omega - \Omega)t + \varphi].</math></p>	
3	Режим зчитування інформації при МЧП	<p>3) <math>I_k = \frac{U_m}{2} \cos \left[ \varphi + \frac{2\pi}{N}(k-1) \right];</math>  <math>\dot{M}_k(t) = M \exp \left\{ j \left[ \Omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1) \right] \right\};</math>  <math>U_{\text{вих}}(t) = -\frac{N U_m \Omega M}{2Z} \sin(\Omega t - \varphi).</math></p>	



1	2	3	4
4	Режим ФАПЧ обертання синхронного електро- двигуна	<p>4) <math>I_k(t) = -\frac{U_m}{\Omega L} \cos[\Omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1)]</math>;  <math>\dot{M}_{k1}(t) = M \exp\{j[\alpha_1 + \frac{2\pi}{N}(k-1)]\}</math>;  <math>\dot{M}_{k2}(t) = M \exp\{j[\alpha_2 + \frac{2\pi}{N}(k-1)]\}</math>;  <math>U_{вух.1}(t) = 0.5 N k_{тр} U_m \sin(\Omega t - \alpha_1)</math>;  <math>U_{вух.2}(t) = 0.5 N k_{тр} U_m \sin(\Omega t - \alpha_2)</math>;  <math>\theta = \alpha_1 - \alpha_2 = const.</math></p>	
5	Тахомет- ричний ре- жим робо- ти	<p>5) <math>I_{bx} = I_0</math>;  <math>\dot{M}_k(t) = M \exp\{j[\Omega t + \alpha + \frac{2\pi}{N}(k-1)]\}</math>;  <math>U_{вух.k}(t) = -I_0 \Omega M \sin[\Omega t + \alpha + \frac{2\pi}{N}(k-1)]</math>;  6) <math>I_{bx}(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t + \varphi)</math>;  <math>\dot{M}_k(t) = M \exp\{j[\Omega t + \frac{2\pi}{N}(k-1)]\}</math>;  <math>U_{вух.k}(t) = 0.5 k_{тр} U_m \{ \sin[(\omega - \Omega)t + \varphi - \frac{2\pi}{N}(k-1)] + \sin[(\omega + \Omega)t + \varphi + \frac{2\pi}{N}(k-1)] \}</math>.</p>	
6	Режим ба- лансного амплітуд- ного лоду- лятора		

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
7	Індикаторний режим роботи на постійнолу струмі	 <p> <math>I_k(t) \cdot \dot{M}_k \rightarrow \dot{\Phi}_k(t)</math>  <math>\dot{\Phi}_1(t) \rightarrow \Sigma</math>  <math>\dot{\Phi}_k(t) \rightarrow \Sigma</math>  <math>\dot{\Phi}_N(t) \rightarrow \Sigma</math>  <math>\dot{\Phi}_0(t) \rightarrow \Sigma</math>  <math>\dot{M}_0 \rightarrow \Sigma</math>  <math>\Sigma \rightarrow I_o(t)</math>  <math>\varphi_{cm} = -\varphi</math>  <math>\alpha = \varphi_{cm} - \varphi_p</math>  <math>\varphi_p = \varphi_0 = 0</math> </p>	
8	Індикаторний режим роботи на зміннолу струмі	<p>7) <math>I_k = I_m \cos [\varphi + \frac{2\pi}{N}(k-1)]</math>;  <math>\dot{M}_k = M \exp \{j \frac{2\pi}{N}(k-1)\}</math>;  <math>\alpha = \varphi_{cm} - \varphi_p = -\varphi</math>.</p> <p>8) <math>I_o(t) = I_{m,o} \sin \omega t</math>;  <math>I_k(t) = I_m \cos [\varphi + \frac{2\pi}{N}(k-1)] \sin \omega t</math>;  <math>\dot{M}_k = M \exp \{j \frac{2\pi}{N}(k-1)\}</math>;  <math>\alpha = \varphi_{cm} - \varphi_p = -\varphi</math>.</p>	
9	Індикаторний режим роботи на зміннолу струмі при імпульсних сигналах	<p>9) <math>I_o(t) = I_m e^{-\gamma t} \cos(\Omega t + \Delta \varphi_r)</math>;  <math>I_k(t) = I_m e^{-\gamma t} \cos[\varphi + \frac{2\pi}{N}(k-1)] \cos(\Omega t + \Delta \varphi_r)</math>;  <math>\dot{M}_k = M \exp \{j \frac{2\pi}{N}(k-1)\}</math>;  <math>\alpha = \varphi_{cm} - \varphi_p = -\varphi</math>.</p>	

співвідношення (1) шляхом виключення складових під косинусом та експонентою, що дорівнюють нулю (для даного режиму роботи).

Вхідні напруги, що подаються на статорні та роторні обмотки, визначаються з таких співвідношень:

- при роботі N-фазного ІПК в режимах, коли вхідна напруга k-тої обмотки не залежить від часу:

$$U_{вх.к} = K\dot{\Phi}_{ст.к}(t)f_k^*(t), \quad (6)$$

де K - коефіцієнт пропорційності;

- при роботі N-фазного ІПК в режимах, коли вхідна напруга k-тої обмотки є функцією часу:

$$U_{вх.к}(t) = d\{\dot{\Phi}_{ст.к}(t)f_k^*(t)\}/dt. \quad (7)$$

Отримане співвідношення (1) та розроблені узагальнені та часткові математичні моделі використовуються для розробки пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів на ІПК, аналіза принципу їх роботи та оцінки інструментальної похибки таких кіл.

У третій главі розроблені структурні схеми таких пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів на основі ІПК:

- оптимальних вимірювачів кута фазового зсуву (КФЗ), в яких ІПК працює в індикаторному режимі на постійному струмі (табл.1, п.7);

- фазометрів з круговою шкалою, в яких ІПК працює в індикаторному режимі на змінному струмі при гармонійних (табл.1, п.8) та імпульсних (табл.1, п.9) вхідних сигналах;

- автоматичного компенсаційного фазометра, 90°-них фазорізничних кіл (ФРК) (табл.1, п.1) та пристроїв завдання КФЗ, в яких ІПК працює в статичному режимі фазообертача;

- фазометрів з МЧП гармонійних (табл.1, п.3) та радіоімпульсних сигналів, в яких ІПК працює в режимі перетворення спектру радіосигналів;

- вимірювачів нелінійності фазових характеристик електричних кіл (табл.1, п.6) (вимірювачів групового часу запізнення (ГЧЗ)), в яких ІПК працює в режимі перетворення спектру радіосигналів (режим зміщення частоти та режим балансного амплітудного модулятора);

- вимірювача КШО валу робочого механізму (табл.1, п.2), пристрою завдання КФЗ з підвищеною точністю та індикаторів асиметрії двофазної та N-фазної систем напруг, в яких ІПК працює в режимі перетворення спектру радіосигналів (зміщення частоти);

- вимірювальних N-фазних генераторів (табл.1, п.5), в яких ІПК працює в тахометричному режимі;

- системи ФАПЧ обертання валів синхронних електродвигунів (табл.1, п.4), в якій ІПК працює в режимі ФАПЧ обертання синхронного електродвигуна.

В таблиці 1 наведені такі скорочення: ОК - об'єкт контролю; БРП - блок розведення променів; БЗП - блок введення променів; АОМ - акустооптичний модулятор; ОПО - оптично прозорий об'єкт;  $k_{\text{тр}}=M/L$  - коефіцієнт трансформації.

Таким чином, на основі математичного моделювання ІПК в дисертаційній роботі розроблений цілий клас пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів з використанням ІПК, який найбільш доцільно використовувати в діапазоні низьких частот.

У четвертій главі отримано співвідношення, що визначає СМП ІПК для реального випадку:

$$\dot{\Phi}_z(t) = \sum_{k=1}^N \dot{\Phi}_{m,k} \cos[\omega t + \varphi + 2\pi(k-1)/N + \Delta\beta_k] \exp\{j[\Omega t + \alpha + 2\pi(k-1)/N + \Delta\alpha_k]\}, \quad (8)$$

де  $\Delta\beta_k$  - асиметрія в фазуванні сигналів на частоті  $\omega$ ;

$\Delta\alpha_k$  - асиметрія просторового кутового положення обмоток.

Абсолютну фазову похибку можна визначити як різницю аргументів реального та ідеального ІПК:

$$\Delta\varphi = \varphi_z - (-\varphi) = \arctg \frac{\sum_{k=1}^N \dot{\Phi}_{m,k} \cos[\varphi + 2\pi(k-1)/N + \Delta\beta_k] \sin[\varphi + \alpha + 2\pi(k-1)/N + \Delta\alpha_k]}{\sum_{k=1}^N \dot{\Phi}_{m,k} \cos[\varphi + 2\pi(k-1)/N + \Delta\beta_k] \cos[\varphi + \alpha + 2\pi(k-1)/N + \Delta\alpha_k]}, \quad (9)$$

а розподіл коефіцієнту, що враховує зміну амплітуди сигналу (амплітудну модуляцію) на виході реального ІПК - з такого співвідношення:

$$D_u = \sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^N (1 + \delta U_{m,k}) \cos[\varphi + 2\pi(k-1)/N + \Delta\beta_k] \cos[\alpha + 2\pi(k-1)/N + \Delta\alpha_k] \right\}^2 + \left\{ \sum_{k=1}^N (1 + \delta U_{m,k}) \cos[\varphi + 2\pi(k-1)/N + \Delta\beta_k] \sin[\alpha + 2\pi(k-1)/N + \Delta\alpha_k] \right\}^2}. \quad (10)$$

Співвідношення для визначення складових інструментальної похибки ІПК можуть бути отримані з (9) та (10) шляхом заміни відповідних помилок параметрів нульовими значеннями.

Чисельне моделювання складових інструментальної похибки ІПК, проведене методом Монте-Карло, дозволяє зробити такі висновки: значний вплив на амплітудні та фазові похибки ІПК чинить відхилення помилок параметрів відносно середнього значення, величина середнього значення впливає (лінійно) лише на фазову похибку ІПК, а збільшення

кількості фаз ІПК N призводить до значного зменшення амплітудних та фазових похибок ІПК при незмінних статистичних характеристиках помилок параметрів, що говорить про перспективність розробки та використання багатофазних ІПК. Наприклад, при нульовому середньому значенні помилок параметрів та середньоквадратичному відхиленні помилок параметрів 2% (амплітудна асиметрія) максимальні фазова похибка та значення коефіцієнту, що враховує зміну амплітуди сигналу на виході реального ІПК відповідно дорівнюють: при  $N=2$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 1.21^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 2\%$ , при  $N=3$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 0.88^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 1.662\%$ , при  $N=4$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 0.79^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 1.347\%$ , при  $N=5$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 0.586^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 0.978\%$ , при  $N=8$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 0.475^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 0.742\%$ , при  $N=10$  -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.мах}}| = 0.283^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Дф.мах}}| = 0.492\%$ . В цьому випадку фазовим асиметриям відповідають приблизно такі ж самі (відхилення не більше 10%) амплітудні та фазові похибки.

Проведена експериментальна перевірка адекватності часткових математичних моделей ІПК для ІІТ третього класу точності дала такі результати: режим фазообертача -  $|\Delta\varphi_{\text{фо.теор}}| \leq 0.694^\circ$ ,  $|\Delta\varphi_{\text{фо.експ}}| \leq 0.702^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.фо.теор}}| \leq 1.24\%$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.фо.експ}}| \leq 1.252\%$ ; режим перетворення спектру радіосигналів (вчитування інформації при МЧП) -  $|\Delta\varphi_{\text{мчп.теор}}| \leq 0.781^\circ$ ,  $|\Delta\varphi_{\text{мчп.експ}}| \leq 0.809^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.мчп.теор}}| \leq 1.182\%$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.мчп.експ}}| \leq 1.197\%$ ; метрологічна атестація дослідних зразків фазометра (індикаторний режим роботи на постійному струмі) -  $|\Delta\varphi_{\text{ф.теор}}| \leq 0.793^\circ$ ,  $|\Delta\varphi_{\text{ф.експ}}| \leq 0.778^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.ф.теор}}| \leq 1.345\%$  і двофазного генератора (тахометричний режим роботи) -  $|\Delta\varphi_{\text{дг.теор}}| \leq 0.409^\circ$ ,  $|\Delta\varphi_{\text{дг.експ}}| \leq 0.398^\circ$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.дг.теор}}| \leq 0.673\%$ ,  $|\varepsilon_{\text{Д.дг.експ}}| \leq 0.691\%$ . Розділення фазових похибок фазометра та двофазного генератора проводилось за методом самоперевірки Повднякова. Результати проведеної експериментальної перевірки показують, що узагальнену математичну модель ІПК доцільно використовувати для аналізу та синтезу пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів на їх основі та оцінки інструментальної похибки таких кіл, тому що розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує 7%.

Додатки містять алгоритм, програму та результати математичного моделювання інструментальної похибки ІПК методом Монте-Карло; результати метрологічної атестації дослідних зразків фазометра та двофазного генератора; акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

- 1) Запропонована класифікація режимів роботи ІПК та пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів на їх основі.
- 2) Розроблений та проаналізований ряд статичних та динамічних



режимів роботи ІПК, який дозволяє в радіовимірювальних приладах замінити нелінійні перетворення сигналів лінійними параметричними, а також їх систематизація.

3) Виходячи з вимог, що ставляться до апроксимуючих функцій при апаратурній реалізації пристроїв, у вигляді співвідношення (1) отриманий ряд, що апроксимує СМП ІПК, а також знайдені умови (2), при яких цей ряд стає ортогональним.

4) На основі аналізу статичних та динамічних режимів роботи ІПК розроблені часткові (за режимами роботи) та узагальнена математичні моделі N-фазних ІПК, які доцільно використовувати для аналізу принципу роботи радіовимірювальних приладів на основі ІПК та оцінки інструментальної похибки таких пристроїв.

5) В результаті проведеного математичного моделювання ІПК розроблений цілий клас пристроїв вимірювання фазових та часових параметрів радіосигналів з використанням ІПК, який найбільш доцільно використовувати в діапазоні низьких частот.

6) На основі узагальненої математичної моделі ІПК розроблені методики для інженерних розрахунків інструментальних похибок та входних сигналів ІПК для різних режимів роботи.

7) Проведено математичне моделювання складових інструментальної похибки (фазової та амплітудної), яке дозволяє для обраного режиму роботи ІПК оцінити вказані похибки в залежності від кількості фаз ІПК N та статистичних характеристик помилок параметрів.

8) Проведена експериментальна перевірка адекватності узагальненої математичної моделі ІПК на макетах вимірювального двофазного генератора і фазометра з круговою шкалою, яка показує, що узагальнена математична модель ІПК може використовуватись для аналізу та синтезу радіовимірювальних приладів на основі ІПК і оцінки інструментальних похибок таких пристроїв, тому що розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень не перевищує  $\pm 7\%$ .

Основні результати роботи по темі дисертації відображені у таких публікаціях:

1. Супьян В.Я., Супьян А.В., Рудик А.В. Параметрическое преобразование информации в фазоизмерительной технике//Ровно:Облтипография, 1994.-98 с.

2. Рудик А.В., Суп'ян О.В. Акустооптичний спосіб вимірювання малих переміщень//Вісник ВПІ.-1995.-№2.-С.58-62.

3. Рудик А.В. Вимірювання нелінійності фазово-частотної характеристики електричного кола//Вісник ВПІ.-1996.-№4.-С.61-65.

4. Супьян В.Я., Супьян А.В., Рудик А.В. Использование фазового

компарирования для расширения функциональных возможностей единого эталона частоты-времени-длины//Метрология и измерительная техника: Тезисы докладов Украинской НТК.-Харьков.-1995.-С.57.

5. Супьян В.Я., Рудик А.В. Динамические погрешности измерения характеристик электрических цепей//Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах и конверсии производства:Тезисы докладов 3-ей НТК.-Хмельницкий.-1995.-С.125-126.

6. Супьян В.Я., Горбатюк С.Н., Рудик А.В. Оптический метод измерения малых амплитуд механических колебаний и перемещений//Контроль и управление в технических системах:Тезисы докладов 3-ей международной НТК.-Винница.-1995.-С.342-343.

7. Рудик А.В. Коммутационный фазометр//Приборостроение:Тезисы докладов международной НТК.-Винница-Судак.-1996.-ч.1.-С.20.

8. Рудик А.В. Измеритель угловой скорости вращения//Приборостроение:Тезисы докладов международной НТК.-Винница-Судак.-1996.-ч.1.-С.21.

9. Рудик А.В.  $90^{\circ}$ -ная фазоразностная цепь//Приборостроение:Тезисы докладов международной НТК.-Винница-Судак.-1996.-ч.2.-С.91.

10. Супьян В.Я., Рудик А.В., Морозов О.В. Радиооптический компаратор фазового сдвига, линейных и угловых перемещений//Актуальные проблемы электронного приборостроения:Труды 3-ей международной НТК.-Новосибирск.-1996.-т.5.-С.93-95.

11. Супьян В.Я., Рудик А.В., Выдмыш А.А. Обобщенная математическая модель индуктивной параметрической цепи//Наука и предпринимательство:Тезисы докладов международного симпозиума.-Львов.-1997.-С.69.

12. Супьян В.Я., Супьян О.В., Рудик А.В. Спосіб фазової синхронізації обертання автономно працюючих синхронних електродвигунів та пристрій для його реалізації//Патент N 17084 (Україна). Кл. Н 02 Р 5/52.-1997.

13. Супьян В.Я., Супьян А.В., Рудик А.В. Фазометр оптического диапазона. Положительное решение о выдаче патента Украины на изобретение по заявке N94128108 от 29.01.1997г.

14. Рудик А.В., Супьян А.В. Компенсационный измеритель группового времени запаздывания четырёхполюсников. Положительное решение о выдаче патента Украины на изобретение по заявке N96083128 от 23.01.1997г.

15. Супьян В.Я., Рудик А.В. Прецизионный калибратор фазы инфранизких и низких частот. Положительное решение о выдаче патента Украины на изобретение по заявке N96083227 от 29.01.1997г.

Особистий внесок. Всі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, які написані у співавторстві, дисертантові належать: розробка мате-

матичної моделі ІПК [1, 11]; розробка структурної схеми [2+4, 6+10, 13+15]; спосіб вимірювання або регулювання [2, 12]; розробка варіантів схемотехнічної реалізації вузлів [1+4, 7+10, 12+15]; оцінка інструментальної похибки [1, 5, 11].

Rudik A.V. Development and research methods and devices of measuring phase and time parameters of radio signals with use of inductive parameter circuits.

A dissertation for the scientific degree of Candidate of technical science on the speciality 05.11.08 - "Radio measuring instrument", Vinnitsa State Technical University, Vinnitsa, 1997.

15 scientific publications are defended. The publications contain the results of theoretical and experimental research of methods and structural diagram devices of measuring phase and time parameters of radio signals with use of inductive parameter circuits. Using such electrical circuits in different statical and dynamical works conditions has made it possible to substitute the non-linear conversions of radio signals on the linear parameters in the low frequency range and to create the class of devices of measuring phase and time parameters of radio signals. Some measuring devices have been developed on the basis of this theoretical research.

Рудик А.В. Разработка и исследование методов и устройств измерения фазовых и временных параметров радиосигналов с применением индуктивных параметрических цепей.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 - "Радиоизмерительные приборы", Винницкий государственный технический университет, Винница, 1997.

Защищается 15 научных работ, в которых содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований методов и структурных схем устройств измерения фазовых и временных параметров радиосигналов с применением индуктивных параметрических цепей. Использование таких электрических цепей в статических и динамических режимах работы позволяет в диапазоне низких частот заменить нелинейные преобразования радиосигналов линейными параметрическими и создать целый класс устройств измерения фазовых и временных параметров радиосигналов. Проведенные теоретические исследования были положены в основу создания ряда измерительных устройств.

Ключові слова: індуктивне параметричне коло, сумарний магнітний потік, кут фазового асуву, кутова швидкість обертання, масштабно-часове перетворення, груповий час запізнення, поворотний трансформатор, фазова автопідстройка частоти.

Підписано до друку 29.05.97 р.  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету.  
Наклад 100 примірників.